

## 大ひずみ域におけるバウシinger 曲線と再負荷曲線

塩 野 功・高 橋 寛

工学部・精密工学科

(昭和61年8月21日受理)

Bauschinger Curves and Re-loading Curves  
at Large Strain

by Isao SHIONO and Hiroshi TAKAHASHI

*Department of Precision Engineering*

Torsional tests of aluminium pipe specimens were carried out to find the features of Bauschinger curves and the successive re-loading curves especially at large strain. The experimental results show that all these curves have transient region where work-hardening pauses. After the transient region these curves coincide with the initial loading curve shifted parallel to the strain axis. These features suggest that the Bauschinger effect is a kind of back-lash phenomenon. A simple model is proposed to predict the re-loading curves.

## 1. ま え が き

予ひずみと逆方向への負荷による降伏点の低下は、バウシinger 効果として従来から数多くの研究の対象とされてきた。しかしその研究の多くは降伏点の低下に主眼が置かれ、バウシinger 曲線の形状が大ひずみ域で最終的にどうなるのかという問題については、注意が払われてこなかったと思われる。バウシinger 曲線が、ひずみの増加に伴って次第に負荷曲線に漸近するのか、あるいは一定応力値だけ低下したまま平行性を保つのか、という問題はバウシinger 効果の解釈を左右するものと思われる。この解釈の如何は、逆負荷後、再度予ひずみ方向へ負荷する再負荷曲線がどうなるかという問題、さらにはその後の繰り返し負荷曲線の予測等につながる重要な問題と思われる。

そこで本研究では以上の問題を実験的に検証する

ために、アルミニウム薄肉円管のねじり試験を行った。大ひずみ域での実験のため、試料の塑性座屈の可能性、試験機の信頼性、ひずみの測定精度など多くの問題を可能な限り改良し、少なくとも50%程度のひずみ範囲まで信頼できるデータが得られたので報告したい。

## 2. 実験方法

実験方法の詳細については文献1)に述べてあるのでここではその概略を記す。

## 2-1 ねじり試験機および試験片

本実験に使用したねじり試験機の概略を図-1に、またその外観を図-2に示す。トルク負荷に

は直流モータを減速しウォームを駆動した。特に大ひずみ域では、ひずみ速度0.02%/秒一定に保持した。

試験片は、市販のアルミニウム押出円管 $\phi 16 \times 2$  (A1070 T E) をそのまま輪切にして用いた。焼鈍条件は450℃ 1時間である。

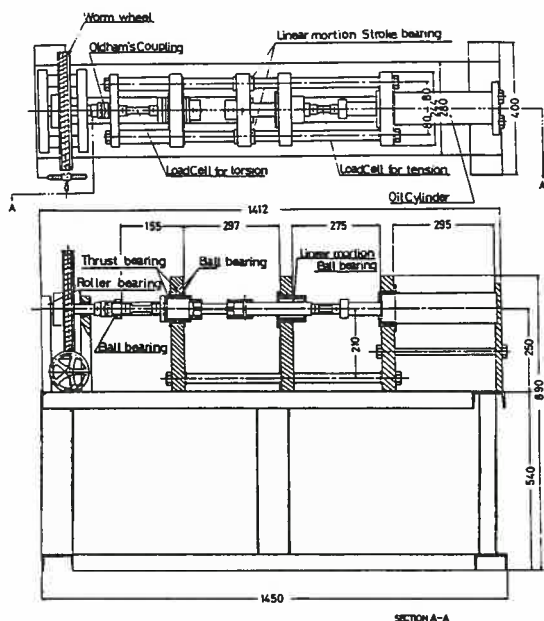


Fig. 1 Torsional test instrument

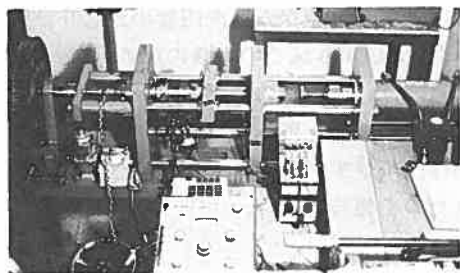


Fig. 2 Appearance of the instrument

## 2-2 ひずみ測定

大きなひずみ域まで精度よく測定するために図-3に示すダイヤルゲージ式ひずみ測定装置を使用した。回転側(A)を矢印の方向にねじったとすると、ワイヤーは試験片に巻きとられ、回転側と固定側の回転量の差が検出される。ダイヤルゲ-

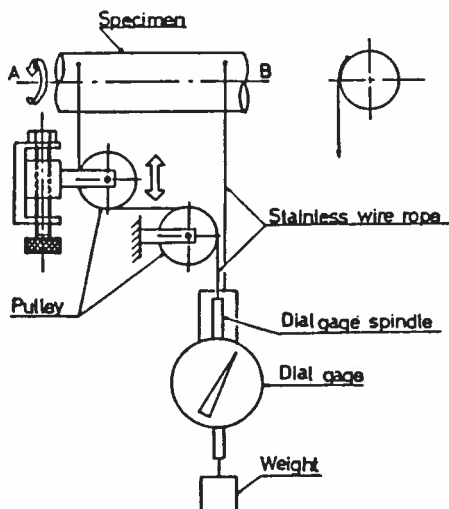


Fig. 3 Strain measuring apparatus

ジ指針軸に、小型ロータリーエンコーダー (コパル社, RE-20, 100P/R) を直結して回転量をデジタル変換しコンピュータ (NEC, PC9801) に入力する。

薄肉円管として応力  $\tau$ , および塑性ひずみ  $\gamma$  を次式で算出した。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= T / 2 \pi a^2 t \\ \gamma &= x / L (1 + t / 2 a) - \tau / G \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし  $T$ : トルク,  $x$ : ダイアルゲージ読み  
 $a = 7\%$ : 肉厚平均半径,  $t = 2\%$ : 肉厚

$L = 40\%$ : 標点距離,  $G = 26 \text{ MPa}$ : 剛性率  
 バウシinger曲線, 再負荷曲線を統一的に表現するために, 次式で定義される流動応力  $\bar{\sigma}$  と, 累積ひずみ  $\bar{\gamma}$  を用いる。

$$\bar{\sigma} = |\tau|, \quad \bar{\gamma} = \int |d\gamma| \quad (2)$$

これを図-4で説明すると, 負荷曲線OA, バウシinger曲線(逆負荷曲線)BC, 再負荷曲線DEは, それぞれOA, BC', D'E'に変換されることになる。

## 3. 実験結果

### 3-1 バウシinger曲線

左ねじりにより予ひずみ  $\gamma_0 = 5, 10, 15, 20, 25, 30\%$  を与え, 右ねじりによってバウシinger曲線

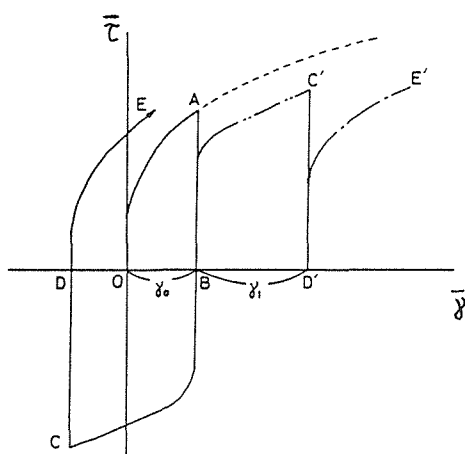


Fig. 4 Presentation of experimental curves

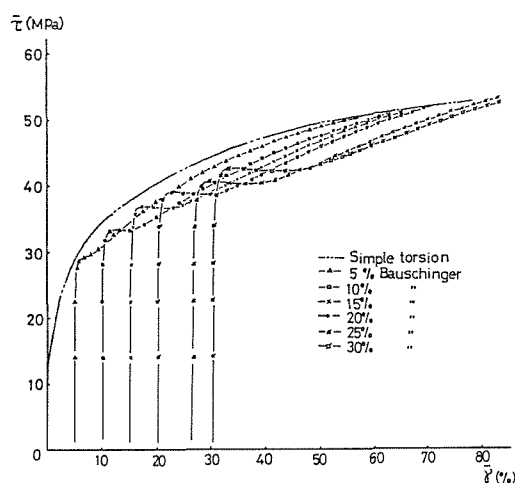


Fig. 5 Bauschinger curves

を求めた結果を図-5に示す。二点鎖線は右への単純ねじり負荷曲線を表わす。いずれのバウシinger曲線にも予ひずみ最終応力より低いところで応力一定の階段部分が存在し、予ひずみの増加に伴ないその領域も増大している。

まえがきで提起した「バウシinger曲線が負荷曲線に漸近するか否か」の問題に関しては、ひずみ50%以上のデータにばらつきがあり結論を下すのは困難であるが、予ひずみ5%バウシinger曲線は除々に負荷曲線に漸近しているようにみえる。これを確かめるために、 $\bar{\gamma}$ の大きなところで $\bar{\tau}$ の差を拡大することを考えてみる。まず図-5の負荷曲線を $n$ 乗則、すなわち $\bar{\tau} = F(\bar{\gamma})^n$ で近似すると次式が得られる。

$$\bar{\tau} = 58(\bar{\gamma})^{0.226} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

そこで図-5の応力軸を $(\bar{\tau}/58)^{1/0.226}$ に変換したものを図-6に示す。これを見ると各バウシinger曲線とも応力一定の領域を経た後は負荷曲線に平行な直線とみなすことができる。従ってバウシinger曲線は、最終的には負荷曲線をひずみ軸に平行移動したもの的一致すると解釈することができる。図-7にその平行移動量 $\Delta\gamma$ を示す。 $\Delta\gamma$ は予ひずみ量 $\gamma_0$ に比例し、その実験式を作ると次式が得られる。

$$\Delta\gamma = 0.8\gamma_0 \quad (4)$$

応力一定の遷移領域では、材料内部に Back stress (逆応力) が働いているものと思われるが、 $\Delta\gamma$ 分の逆ねじりにより、一旦左予ひずみによる Back stress が消滅し、さらに右ひずみによる Back stress が累積して、やがて右方向の加工硬化が始まるものと考えられる。

以上のことからバウシinger効果とは、Back stress の消滅、生成をとまなうバックラッシュ現象としてとらえることが可能と思われる。

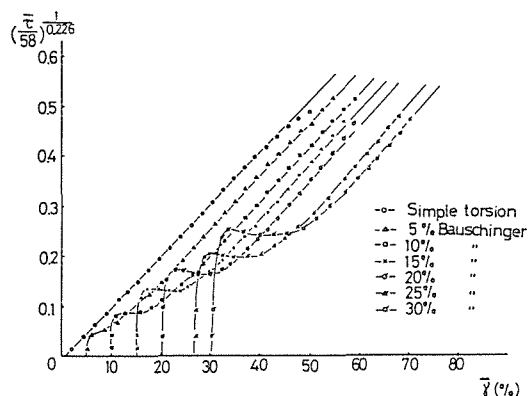
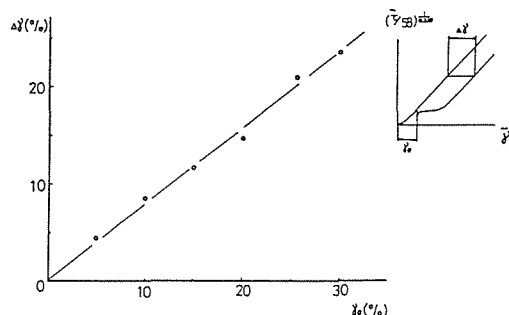


Fig. 6 Linearized Bauschinger curves

Fig. 7 Shift strain  $\Delta\gamma$  of Bauschinger curves

### 3-2 再負荷曲線

左ねじりにより予ひずみ  $\gamma_0 = 5, 10, 15\%$  を負荷した後右ねじりで逆ねじり予ひずみ  $\gamma_1$  を与え、さらに左ねじりにより再負荷曲線を求めた。結果をそれぞれ図-8, 9, 10に示す。逆ねじり予ひずみとして  $\gamma_1 = 2, 4, 6, 10, 15, 20, 25, 30\%$  の8通りを与えた。二点鎖線は左の単純ねじり負荷曲線を、破線はバウシinger曲線を示す。予ひずみごとに同一ロットの材料を使用した、その材料定数  $n$  と  $F$  を表-1に示す。

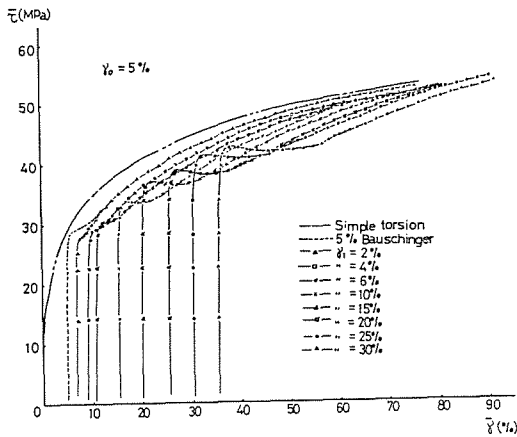


Fig. 8 Re-loading curves after 5% pre-strain and various reverse strains

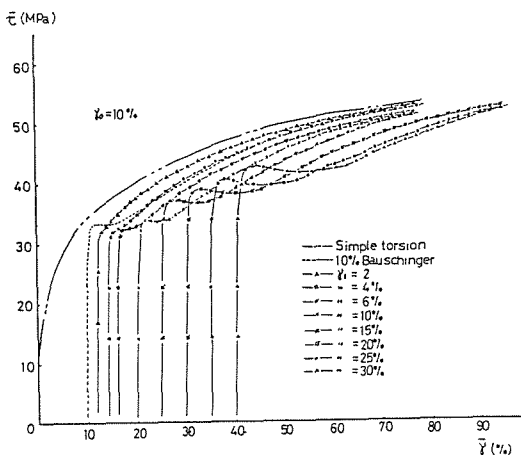


Fig. 9 Re-loading curves after 10% pre-strain and various reverse strains

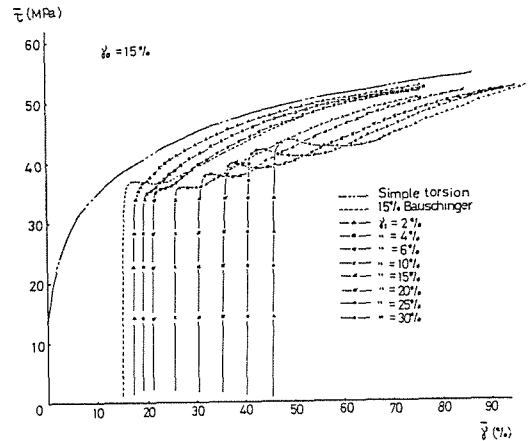


Fig.10 Re-loading curves after 15% pre-strain and various reverse strains

Table 1 Material constants for test specimens

	$n$	$F$
$\gamma_0 = 5\%$	0.226	58
" $= 10\%$	0.226	58
" $= 15\%$	0.224	58

$$\bar{\tau} = F (\bar{\gamma})^n$$

前節と同じように、応力軸を  $(\bar{\tau}/F)^{1/n}$  に変換したものを図-11, 12, 13に示す。この場合も応力一定領域を経た後は負荷曲線に平行な直線とみなすことができる。図-14に負荷曲線の平行移動量  $\Delta\gamma$  と逆ねじり予ねずみ  $\gamma_1$  の関係を示す。ここで  $\gamma_0 = 0\%$  の再負荷曲線というのは、バウシinger曲線のことである。初期の焼鈍状態で右ねじり、左ねじりが対称ならば上記の二つの曲線は同一のものと考えてよい。さて図から分かるように  $\Delta\gamma$  と  $\gamma_1$  の関係は二種類の勾配の直線で表わすことができる。たとえば予ひずみ  $\gamma_0 = 10\%$  の場合、 $\gamma_1$  が約 9%までは傾きが2であり、さらに  $\gamma_1$  の大きい範囲では  $\gamma_0 = 0\%$  の傾きと一致する。傾きが2の領域は、逆ねじり予ひずみが小さい範囲に表われ、図-8, 9, 10にみられるようにバウシinger曲線の降伏点よりもさらに低い降伏応力が表われる。

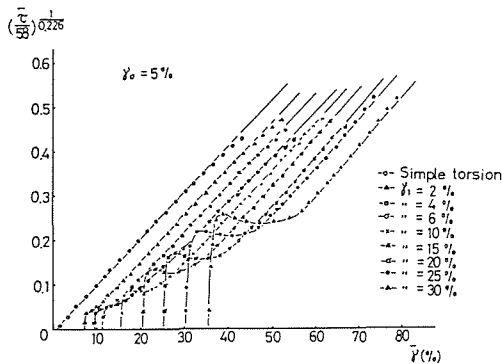


Fig.11 Linearized re-loading curves after 5% prestrain and various reverse strains

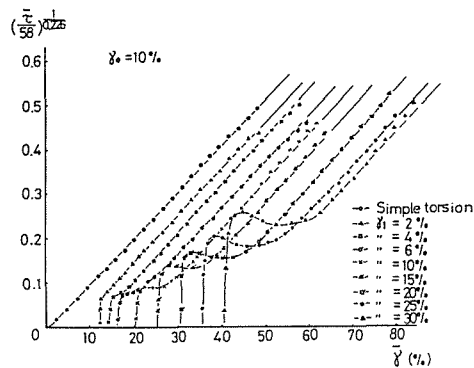


Fig.12 Linearized re-loading curves after 10% prestrain and various reverse strains

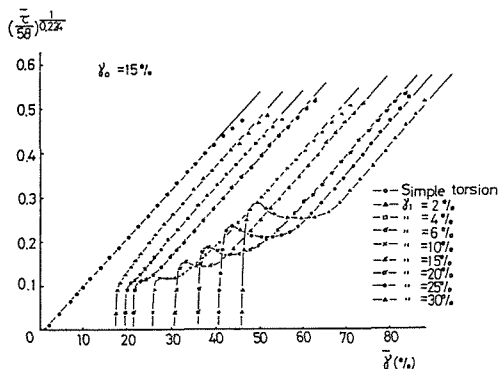


Fig.13 Linearized re-loading curves after 15% prestrain and various reverse strains

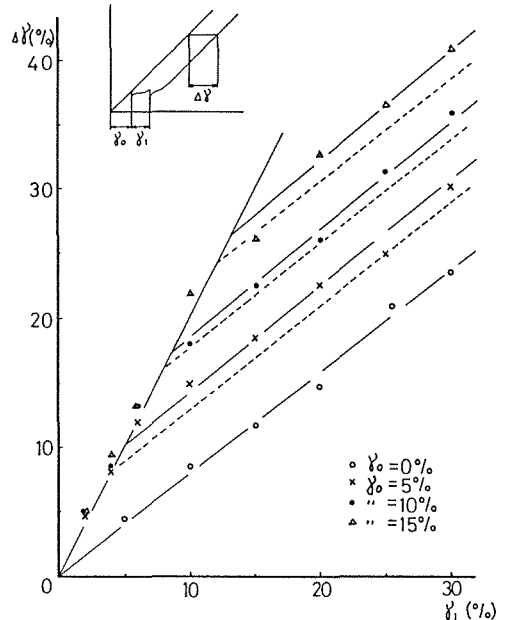


Fig.14 Shift strain  $\Delta\gamma$  of Bauschinger curves and re-loading curves

バウシンガー効果をバックラッシュ現象として解釈する立場から、図-14を次のように解釈することができるとされる。

今、逆負荷が式(4)で表わされる遷移領域内にある場合、すなわち  $\gamma_1 < 0.8\gamma_0$  の場合、変形が可逆的であると仮定すれば、 $\gamma_1$  だけ正方向にもどれば負荷曲線に一致するはずである。したがって

$$\Delta\gamma = 2\gamma_1 \quad (5)$$

次に  $\gamma_1 = 0.8\gamma_0$  ならば、材料は正ねじりの記憶を忘れ、初めからひずみ  $\gamma_0$  負のねじりをうけた材料とみなされる。したがって  $\gamma_1 > 0.8\gamma_0$  ならば初めから負のねじりひずみ  $\gamma_0 + (\gamma_1 - 0.8\gamma_0) = \gamma_1 + 0.2\gamma_0$  をうけた材料と同じになる (図-15)。これを正にねじる場合 (再負荷曲線)、予ひずみ  $\gamma_1 + 0.2\gamma_0$  のバウシンガー曲線に一致するはずである。すなわち再負荷曲線における負荷曲線の平行移動量  $\Delta\gamma$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta\gamma &= 0.8\gamma_0 + 0.8(\gamma_1 + 0.2\gamma_0) \\ &= 0.8\gamma_1 + 0.96\gamma_0 \end{aligned} \quad (6)$$

この結果を図-14に破線で示す。実験結果と同様の傾向を示すものの約2%の誤差がありさらに検討の必要があると思われる。

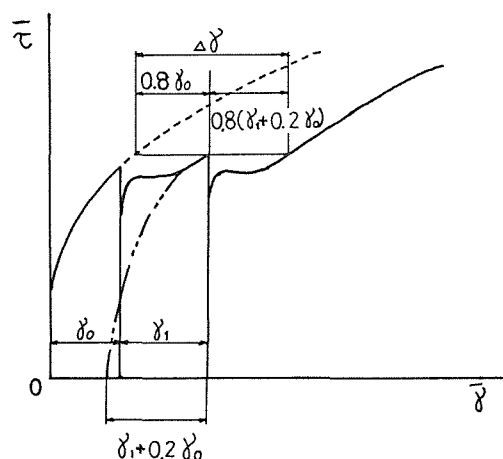


Fig.15 Illustration for prediction of re-loading curves

ずみ50%程度までのバウシinger曲線及び再負荷曲線を求めることができた。その結果バウシinger曲線、再負荷曲線の特徴を次のようにまとめることができる。

- (1)バウシinger曲線において、予ひずみ最終応力より低いところで応力一定の遷移領域が存在し、やがて負荷曲線をひずみ軸に平行移動したものと一致する。その平行移動量 $\Delta\gamma$ は予ひずみ量の0.8倍となる。
- (2)再負荷曲線においても、応力一定領域が存在し、それを過ぎると負荷曲線をひずみ軸に平行移動したものと一致する。バウシinger効果をバックラッシュ現象として解釈することにより、再負荷曲線の予測が可能となる。

#### 4. まとめ

アルミニウム薄肉円管のねじり試験により、ひ

#### 参考文献

- 1) 高橋・ほか3名, 機論, 50-450(昭59), 184.